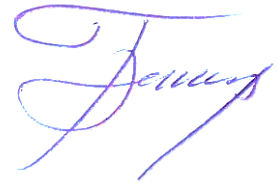


На правах рукописи



Бенариев Ильяс

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
МАЛОДЕФОРМАЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ ТОНКОСТЕННЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В-1341 СИСТЕМЫ Al-Mg-Si**

Специальность: 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) и Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Пучков Юрий Александрович**
кандидат технических наук, доцент кафедры
материаловедения МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Бецофен Сергей Яковлевич**
доктор технических наук, профессор Образова-
тельного центра Института №11 «Новые
материалы и производственные технологии»
ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Поздняков Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры
металловедения цветных металлов
НИТУ «Московский институт стали и сплавов»
(НИТУ «МИСиС»)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-
вательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва»
(Самарский университет)

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба
высылать в двух экземплярах по указанному адресу на имя ученого секретаря
диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном
сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>.

Телефон для справок: 8(499) 263-66-33 (доб. 36-28)

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01,
кандидат технических наук, доцент



Плохих Андрей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная техника предъявляет высокие требования к комплексу свойств конструкционных материалов при их производстве и эксплуатации. Важной задачей материаловедения остается дальнейшее совершенствование технологии термической обработки деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si-(Cu) (серия 6XXX) с целью улучшения качества и снижения стоимости продукции. В России перспективным материалом является высокотехнологичный коррозионностойкий сплав В-1341 системы Al-Mg-Si (типа АВ), который предназначен для применения в наземном транспорте и авиастроении взамен менее прочных и менее технологичных алюминиевых сплавов систем Al-Mn (АМц) и Al-Mg (АМг2, АМг6), а также зарубежных аналогов серии 6XXX. Сплав применяется в виде лент, листов и бесшовных труб для изготовления различных тонкостенных изделий с использованием методов холодного формообразования, сварки и пайки (листовые штамповки, гнутые трубопроводы, топливные баки и баллоны, элементы теплообменников и т.д.).

В практике производства предприятия-изготовители указанных изделий в ряде случаев подвергают материал дополнительной операции термообработки – закалке для достижения достаточной технологической пластичности при формообразовании и термического упрочнения при последующем искусственном старении. Традиционная закалка в холодной воде характеризуется повышенной неравномерностью и интенсивностью охлаждения, что вызывает высокие термические напряжения по сечению детали. Это может приводить к существенным геометрическим отклонениям (короблению) или даже образованию трещин, что становится причиной брака продукции или необходимости проведения трудоемких операций правки.

Для решения актуальной практической проблемы снижения коробления тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов целесообразно использовать малодеформационную закалку, при которой обеспечивается уменьшение неравномерности и скорости охлаждения с помощью альтернативных закалочных сред (водно-полимерные среды, газовые среды, водовоздушные смеси и т.д.). Такой подход позволяет значительно уменьшить степень коробления после закалки и, соответственно, улучшить качество продукции, а также сократить затраты на трудоемкие операции правки для восстановления требуемой геометрии.

Однако снижение скорости закалочного охлаждения может приводить к ухудшению комплекса свойств материала вследствие нежелательного частичного распада пересыщенного твердого раствора (ПТР). В связи с этим возможность проведения малодеформационной закалки определяется прежде всего критической скоростью охлаждения сплава – наименьшей скоростью, позволяющей практически избежать распада ПТР, и, как следствие, толщиной изделия.

На сегодняшний день для сплавов серии 6XXX практически отсутствуют систематические исследования по проблематике применения закалочного охлаждения с пониженными скоростями с целью проведения малодеформационной закалки. В частности, это связано с недостаточной изученностью закалочной чувствительности данных сплавов, особенно дополнительно легированных медью. Кроме того, для научно обоснованного выбора режима охлаждения при закалке необходимо дальнейшее развитие методик моделирования для повышения точности прогнозирования фазовых превращений и свойств материала при термической обработке.

Цель работы: снижение коробления тонкостенных изделий из сплава В-1341 системы Al-Mg-Si путем закалки в газовых и водно-полимерных средах при получении структуры, обеспечивающей заданный уровень механических свойств.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния в области исследований малодеформационной закалки и закалочной чувствительности термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

2. Исследовать закалочную чувствительность листов из сплава В-1341 на основе анализа структурно-фазовых превращений и изменения свойств в зависимости от скорости закалочного охлаждения.

3. Разработать и валидировать усовершенствованную методику расчета параметров уравнения С-кривой изотермической диаграммы «температура-время-превращение» (ТВП) для деформируемых сплавов системы Al-Mg-Si.

4. Оценить возможность закалочного охлаждения листовых заготовок из сплава В-1341 в газовых средах на основе компьютерного моделирования.

5. Проанализировать охлаждающую способность газовых сред и водно-полимерной среды на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида (ПЭО) при закалке листовых образцов из сплава В-1341.

6. Провести экспериментальное исследование малодеформационной закалки листовых заготовок из сплава В-1341 в различных охлаждающих средах.

7. Разработать практические рекомендации по малодеформационной закалке тонкостенных изделий из сплава В-1341.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что при замедленном закалочном охлаждении (ниже критической скорости) со скоростью от 0,3 до 10 °C/с в интервале температур от 375 до 300 °C при распаде ПТР формируются преимущественно метастабильные β' (Mg₉Si₅)- и β' (Al₃Mg₉Si₇)-фазы в виде крупных стержнеобразных частиц, зарождающихся по гетерогенному механизму на поверхности дисперсоидов α -фазы (Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂) и растущих вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ алюминиевой матрицы. Выявлено, что в состав закалочных выделений входит медь, которая при повышенном содержании в локальных участках приводит к их структурной неоднородности.

2. Разработана и валидирована усовершенствованная методика расчета кинетических параметров уравнения С-кривой изотермической ТВП-диаграммы при образовании метастабильной β' (β')-фазы для деформируемых сплавов системы Al-Mg-Si (серии 6XXX), позволяющая с повышенной точностью прогнозировать долю закалочных выделений.

3. Впервые для листов из сплава В-1341 на основе математического моделирования построена термокинетическая ТВП-диаграмма, описывающая кинетику выделения метастабильной β' (β')-фазы при замедленном закалочном охлаждении и позволяющая научно обоснованно выбирать режимы охлаждения при закалке.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные практические рекомендации применены в НИОХ СО РАН для выбора оптимального состава перспективной водно-полимерной закалочной среды на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида (ПЭО), а также использованы в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для разработки технологии малодеформационной закалки листовых деталей и полуфабрикатов из промышленных деформируемых алюминиевых сплавов (ТР 1.2-3197-2025).

2. Результаты работы представляют практический интерес для машиностроительных предприятий РФ, поскольку обеспечивают снижение коробления изделий после закалки, что позволит сократить брак продукции и трудоемкость на операции правки. По заключению предприятия АО ПКО «Теплообменник» предложенные рекомендации по малодеформационной закалке целесообразно использовать при термическом упрочнении элементов из сплава В-1341, входящих в паяную конструкцию теплообменных аппаратов.

3. Полученные с помощью разработанной методики значения параметров уравнения С-кривой для рассмотренных сплавов серии 6XXX и исследуемого сплава В-1341 рекомендуются для внесения в базу данных программ инженерного анализа, что позволит научно обоснованно разрабатывать режимы малодеформационной закалки и сократить затраты на экспериментальные исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния скорости закалочного охлаждения на структурно-фазовое состояние и изменение свойств листов из сплава В-1341, определяющие его закалочную чувствительность.

2. Методика расчета параметров уравнения С-кривой изотермической ТВП-диаграммы для сплавов системы Al-Mg-Si, позволяющая с повышенной точностью прогнозировать долю закалочных выделений.

3. Термокинетическая ТВП-диаграмма для листов из сплава В-1341, позволяющая научно обоснованно выбирать режимы охлаждения при закалке.

Достоверность результатов работы обеспечена согласованностью экспериментальных данных, полученных с использованием различных взаимодополняющих методов исследований на сертифицированном современном аналитическом и испытательном оборудовании, сопоставимостью с литературными данными, а также публикациями в ведущих рецензируемых научных изданиях и докладами на конференциях.

Личный вклад автора состоит в выполнении всех этапов диссертационного исследования, в том числе: в составлении плана и постановке задач исследований; в аналитическом обзоре литературы; в проведении расчетов при моделировании; в получении, обработке и обобщении результатов экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты диссертации обсуждены на Всероссийских научно-практических конференциях: XV Всероссийской конференции «ТестМат» «Современные подходы и тенденции развития структурно-фазовых, химико-аналитических методов анализа», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (Москва, 2023); Всероссийской научно-технической конференции «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов», ФГУП «ВИАМ» (Москва, 2019); IV Всероссийской конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», ФГУП «ВИАМ» (Москва, 2018); Всероссийской научно-технической конференции «Современные достижения в области металловедения, технологий литья, деформации, термической обработки и антикоррозионной защиты легких сплавов», ФГУП «ВИАМ» (Москва, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных трудов общим объемом 4,9 п.л., в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 4 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 16 таблиц, состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 166 наименований, списка используемых обозначений и сокращений, списка нормативных ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены ее научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена аналитическому обзору литературных источников по теме диссертационной работы. Проведена оценка современного состояния и выявлены последние достижения в рассматриваемой области исследований.

Отмечено, что снижение коробления при закалочном охлаждении тонкостенных изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов, в том числе перспективного сплава В-1341, остается актуальной практической задачей на производстве. Показано, что ее возможно эффективно решать с помощью малодеформационной закалки, обеспечивающей снижение коробления за счет уменьшения неравномерности и интенсивности охлаждения с помощью альтернативных закалочных сред (водные растворы полимеров, водовоздушные смеси, воздух и т.д.) вместо холодной воды. При этом необходимо учитывать закалочную чувствительность сплава – зависимость структуры и свойств сплава после старения от скорости предшествующего закалочного охлаждения.

На сегодняшний день технология малодеформационной закалки достаточно хорошо освоена при использовании водно-полимерных сред на основе полиакриленгликоля (ПАГ) или полиэтиленоксида (ПЭО) для промышленных алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Mg и Al-Zn-Mg-Cu (И.Н. Фридляндер, В.А. Коптюг, О.Г. Сенаторова, Г.П. Конюхов и др.). Промышленное опробование показало, что при закалке листовых деталей из данных сплавов в водно-полимерной среде на основе ПЭО коробление снижается в 2–5 раз по сравнению с традиционной закалкой в холодной воде. Это позволило снизить трудоемкость правильно-доводочных работ на 50–60 %.

Для закалки изделий из сплавов системы Al-Mg-Si в зависимости от их закалочной чувствительности могут применяться газовые охлаждающие среды и водовоздушные смеси, которые позволяют достичь значительного снижения степени коробления при сохранении требуемых свойств. При совмещении операции закалки в данных средах с охлаждением от температуры горячей деформации или высокотемпературной пайки также повышается производительность технологического процесса. Однако технологические основы применения малодеформационной закалки для сплавов системы Al-Mg-Si остаются недостаточно разработанными.

Установлено, что закалочная чувствительность термически упрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si-(Cu) (серия 6XXX) в настоящее время является важным предметом исследований. При этом остаются недостаточно изученными кристаллическая структура, морфология и механизм образования закалочных выделений, особенно в сплавах с добавкой меди.

Выявлено, что важной тенденцией при разработке режимов упрочняющей термической обработки алюминиевых сплавов является применение математического моделирования, в частности, по методике, основанной на анализе закалочного фактора. Однако существующие модели требуют дальнейшего совершенствования и накопления базы данных по материалам с целью повышения точности расчетов.

По результатам аналитического литературного обзора сформулированы цель и основные задачи работы.

В Главе 2 приведено описание объекта и методов исследования, а также используемого оборудования. В качестве объекта исследования выбраны промышленные холоднокатаные листы толщиной 0,6, 1,2 и 4,0 мм из сплава В-1341 в исходных состояниях Н2 или Т. Химический состав листов соответствовал марочному составу сплава по ОСТ 90048 (% масс.): 0,73 Mg; 0,60 Si; 0,18 Cu; 0,27 Mn; 0,07 Ca; 0,23 Fe; 0,02 Cr; 0,06 Ti; 0,02 Zn; Al – осн.

Для изучения закалочной чувствительности сплава проведена термическая обработка экспериментальных листовых образцов толщиной 0,6 и 1,2 мм. Обработка на твердый раствор экспериментальных образцов осуществлялась по стандартному режиму. Затем их подвергали закалке с различной скоростью охлаждения, которую контролировали с помощью термопары хромель-алюмель (тип К), закрепленной на поверхности образца. Использовали следующие закалочные среды: холодная вода ($V_{\text{охл}} = 1330\text{--}1900$ °C/с); водно-полимерная среда на основе ПЭО с концентрацией полимера 0,10 % ($V_{\text{охл}} = 950$ °C/с); воздух ($V_{\text{охл}} = 0,1\text{--}10$ °C/с), где $V_{\text{охл}}$ – средняя скорость охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости ПТР (от 400 до 260 °C). В состав водно-полимерной среды помимо ПЭО входил вспомогательный компонент Синтанол-10 (оксиэтилированный спирт) с концентрацией 1,0 %. Скорость закалочного охлаждения на воздухе регулировали путем оборачивания образцов алюминиевой фольгой или асбестовым полотном. После закалки на одной группе образцов проводили естественное старение (состояние Т), а на другой группе образцов – искусственное старение (состояние Т1).

Кроме того, проведена термическая обработка листовых заготовок (пластин) размером 1,2×60×350 мм для оценки степени коробления и контроля свойств после закалки с охлаждением в следующие среды: холодная вода; водно-полимерная среда на основе ПЭО с концентрацией полимера 0,10 или 0,20 %; воздух. Далее незамедлительно следовало искусственное старение на состояние Т1. Величину коробления определяли путем измерения неплоскостности – отклонения ординат контрольных точек по периметру пластины от горизонтальной плоскости (ГОСТ 26877).

Исследование структуры и фазового состава проводили следующими методами: световая микроскопия; рентгенофазовый анализ (РФА) и рентгеноструктурный анализ; растровая электронная микроскопия (РЭМ) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа (РСМА); просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) с приставкой для РСМА; дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Механические свойства при растяжении ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, δ) определяли на испытательной машине при комнатной температуре. Микротвердость определяли по методу Виккерса (HV) на подготовленных шлифах с помощью микротвердомера при нагрузке 50 г. Удельную электрическую проводимость γ (электропроводимость) измеряли вихретоковым методом. Электрохимические исследования (вольтамперметрия, импедансная спектроскопия) выполнены на потенциостате с использованием анализатора частотного отклика в 0,04 % водном растворе NaCl. Испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) образцов проводили при погружении образцов в водный раствор № 2 (NaCl + H₂O₂) по ГОСТ 9.021.

Оценка охлаждающей способности закалочных сред осуществлена на листовых образцах из сплава В-1341 толщиной 4 мм в лабораторных условиях МГТУ им. Н.Э. Баумана и НИОХ СО РАН с использованием специализированной установки. Рассмотрены следующие среды: холодная вода (20 °C); горячая вода (80 °C); водно-полимерная среда на основе ПЭО с концентрацией полимера от 0,08 до 0,30 %; газообразный азот высокого давления (0,2 и 0,73 МПа) с принудительной циркуляцией среды; воздух со скоростью потока 3 м/с; спокойный воздух.

Равновесный фазовый состав сплава В-1341 рассчитан с помощью термодинамического моделирования методом CALPHAD в специализированном программном обеспечении. Компьютерное моделирование процесса закалочного охлаждения выполнено в программном комплексе ANSYS Workbench.

В Главе 3 представлены результаты исследования закалочной чувствительности листов из сплава В-1341 на основе анализа влияния скорости закалочного охлаждения на структурно-фазовое состояние и свойства.

Металлографический анализ показал, что после закалки листы имеют равномерную мелкозернистую рекристаллизованную структуру со средним размером зерна 34–39 мкм (Рис. 1, а). По данным рентгеноструктурного анализа установлено, что в листах преобладает кубическая текстура рекристаллизации $\{001\}<100>$ независимо от скорости закалочного охлаждения (Рис. 1, б).

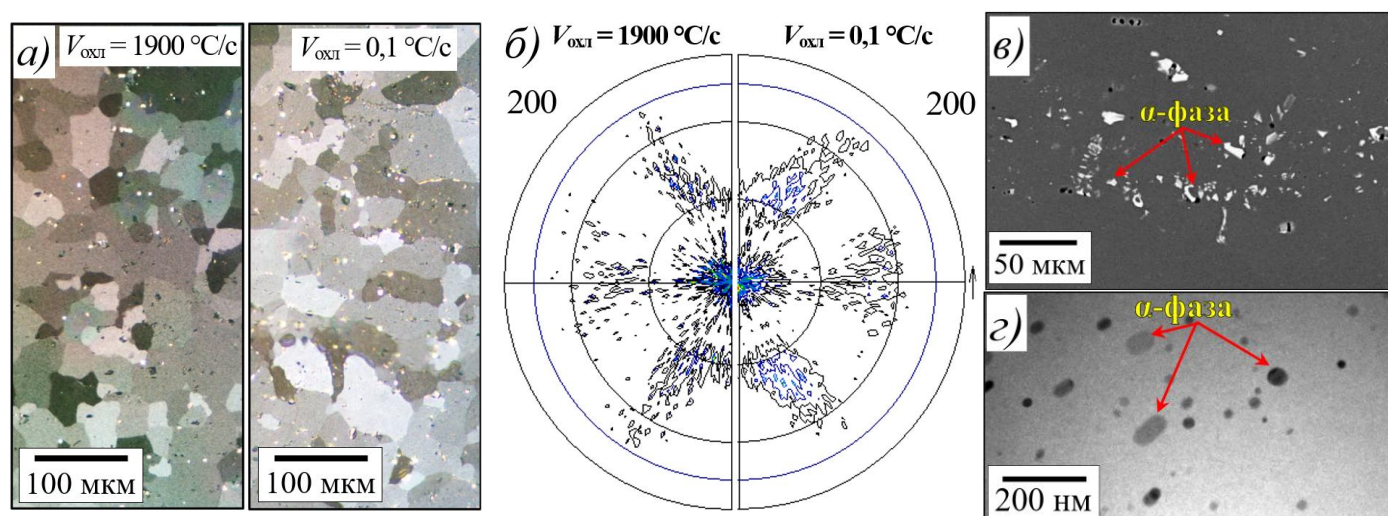


Рис. 1. Зеренная структура в поляризованном свете (а), прямые полюсные фигуры (б) и электронно-микроскопические изображения структуры (в, г) листов из сплава В-1341Т1

По результатам РФА и термодинамического моделирования (Рис. 2) выявлено, что доминирующей избыточной фазой в сплаве является α -фаза ($\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$), которая в основном формируется при первичной кристаллизации (1,08 мол. %, Рис. 2, б) в виде крупных интерметаллидов неправильной формы по данным РЭМ (Рис. 1, в). Меньшая часть α -фазы выделяется в твердом состоянии (0,30 мол. %, Рис. 2, б) при высоких температурах от 550 до 615 °С во время гомогенизации слитков в виде дисперсоидов округлой формы по данным ПЭМ (Рис. 1, г).

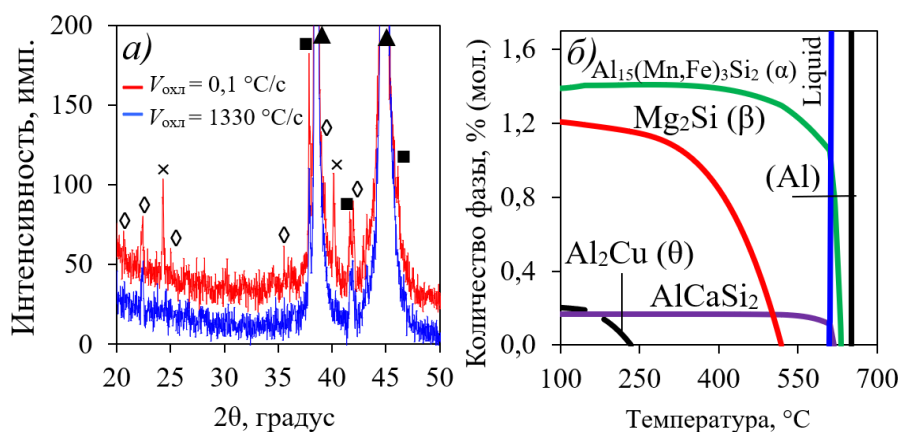


Рис. 2. Дифрактограмма (а) листов из сплава В-1341Т1 в зависимости от скорости закалочного охлаждения: ▲ (Al); ◇ $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ (α); × Mg_2Si (β); ■ Al_{12}Mn , и рассчитанный методом CALPHAD равновесный фазовый состав исследуемого сплава (б)

Термодинамические расчеты равновесного фазового состава также предсказывают возможное присутствие в сплаве β -фазы (до 1,2 мол. %) и θ -фазы (до 0,2 мол. %) в области температур закалочного охлаждения. На дифрактограмме образца (Рис. 2, а), закаленного с низкой скоростью охлаждения ($V_{\text{охл}} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C/c}$), выявлено наличие равновесной β -фазы (Mg_2Si). При этом равновесных медьсодержащих фаз θ (Al_2Cu) и Q ($\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$) не обнаружено.

По результатам ПЭМ в сочетании с РСМА (Рис. 3–5) установлено, что закалка с низкой скоростью охлаждения (0,3 или $1 \text{ } ^\circ\text{C/c}$) приводит к интенсивному распаду ПТР с образованием крупных выделений, содержащих Mg и Si с разным соотношением Mg/Si , а также Cu в малом количестве (например, частицы № 1 и № 10 на Рис. 4). Среднее атомное соотношение Mg:Si:Cu в частицах составляет 15:10:1. Закалочные выделения зарождаются в первую очередь на поверхности дисперсоидов α -фазы, затем по мере роста коагулируют в отдельные более крупные конгломераты (Рис. 4). Также присутствуют единичные более крупные закалочные выделения пластинчатой формы, располагающиеся в основном на границах зерен (Рис. 3, г) с соотношением $\text{Mg/Si} \sim 2$, что характерно для равновесной $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ -фазы.

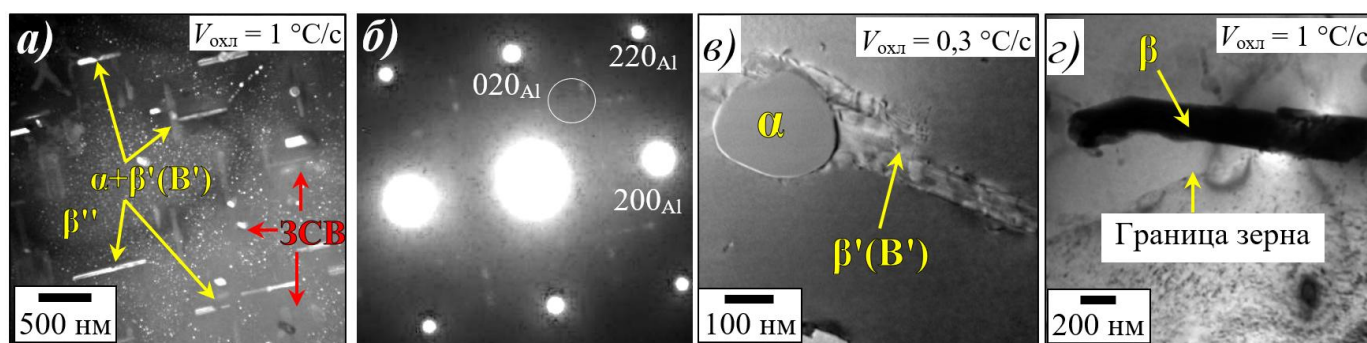


Рис. 3. Структура листов из сплава В-1341Т1 после замедленного закалочного охлаждения (ось зоны $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$): а) характер распада ПТР в темном поле (ЗСВ – зоны, свободные от выделений); б) картина микродифракции для Рисунка 3а; в) вид стержнеобразных закалочных выделений на дисперсоиде; г) вид закалочного выделения пластинчатой формы на границе зерна

Как правило, закалочные выделения имеют форму продолговатых стержней, расположенных симметрично на дисперсоидах и ориентированных в направлении $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$, вдоль которого происходит их рост. Это приводит к обеднению прилегающих участков ПТР, а затем уменьшению доли и плотности выделения упрочняющих частиц $\beta''(\text{Mg}_5\text{Si}_6)$ -фазы при старении и, соответственно, к образованию зон, свободных от выделений (Рис. 3, а). Из характерной дифракционной картины на электронограмме (Рис. 3, б) следует, что обнаруженные на дисперсоидах закалочные выделения соответствуют метастабильным фазам β -типа. Для идентификации их кристаллической структуры с использованием ПЭМ ВР получены картины Фурье, которые сопоставлены с расчетными электронограммами предполагаемых фаз. Установлено, что выделения соответствуют фазам с гексагональной кристаллической решеткой (Рис. 5, в, е): $\beta'(\text{Mg}_9\text{Si}_5)$ -фазе ($a = 0,705 \text{ нм}$; $c = 0,405 \text{ нм}$) и $\text{B}'(\text{Al}_3\text{Mg}_9\text{Si}_7)$ -фазе ($a = 1,04 \text{ нм}$; $c = 0,405 \text{ нм}$). При этом анализ расчетных электронограмм показал, что указанные фазы имеют следующие ориентационные соотношения с алюминиевой матрицей: $(001)_{\beta'} \parallel (100)_{\text{Al}}$; $[110]_{\beta'} \parallel [010]_{\text{Al}}$ и $(001)_{\text{B}'} \parallel (100)_{\text{Al}}$; $[\bar{1}10]_{\text{B}'} \parallel [011]_{\text{Al}}$.

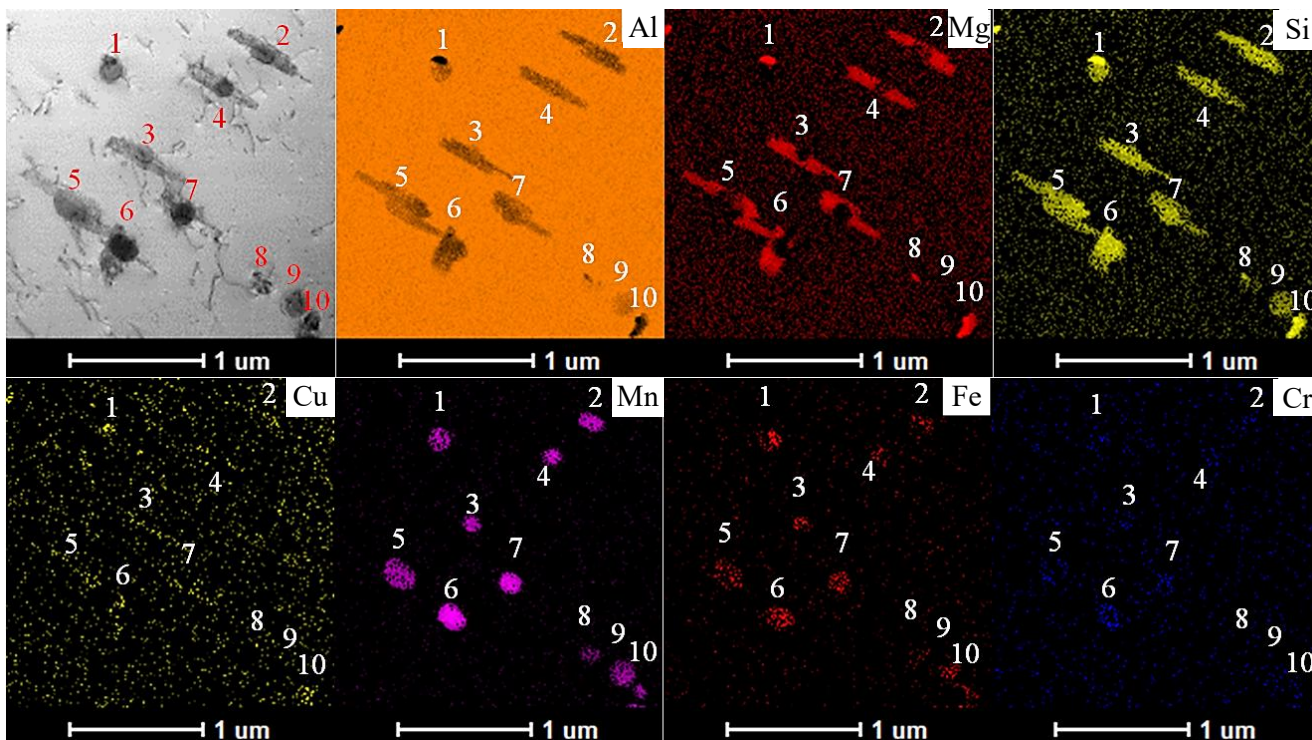


Рис. 4. Карта распределения элементов, иллюстрирующая состав выделений в структуре листов из сплава В-1341Т после замедленного закалочного охлаждения ($V_{\text{охл}} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$)

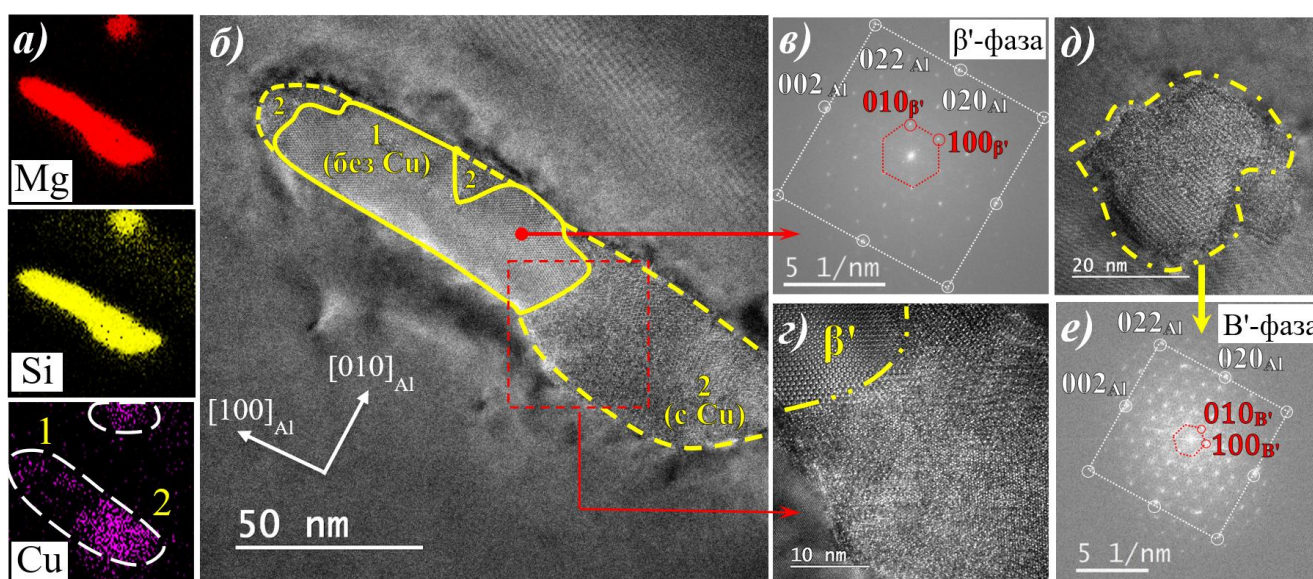


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения высокого разрешения для листов из сплава В-1341Т после замедленного закалочного охлаждения ($V_{\text{охл}} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$):

а) карта распределения элементов; б, в, д) вид стержнеобразных частиц в поперечном сечении; е, е) картины Фурье

В ходе анализа тонкой структуры с помощью ПЭМ ВР было также выявлено, что некоторые закалочные выделения могут состоять из областей со структурной неоднородностью, где расшифровка кристаллической структуры затруднительна. Между наблюдаемой структурной неоднородностью и локальным содержанием меди выявлена устойчивая корреляция, отражающая значительное влияние Cu на формирование закалочных выделений (например, область № 2 на Рисунке 5б). Сделано предположение, что повышенное содержание меди в таких областях приводит к их фрагментации, в том числе к образованию отдельных фрагментов с кристаллической решеткой метастабильных медьсодержащих фаз Q-типа ($\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$).

ДСК-анализ (кривые 2 и 3, Рис. 6, а) показал, что при нагреве образцов, закаленных в воде или на воздухе, протекает экзотермическая реакция в температурном интервале от 200 до 350 °С (температура пика 280–290 °С), указывающая на выделение метастабильных β'' - и $\beta'(B')$ -фаз. Таким образом, это подтверждает возможность закалки сплава на спокойном воздухе. Для образца, которому предшествовало замедленное закалочное охлаждение с низкой скоростью ($V_{\text{охл}} = 0,1$ °С/с), выделение метастабильных фаз при нагреве явно не выражено (кривая 4).

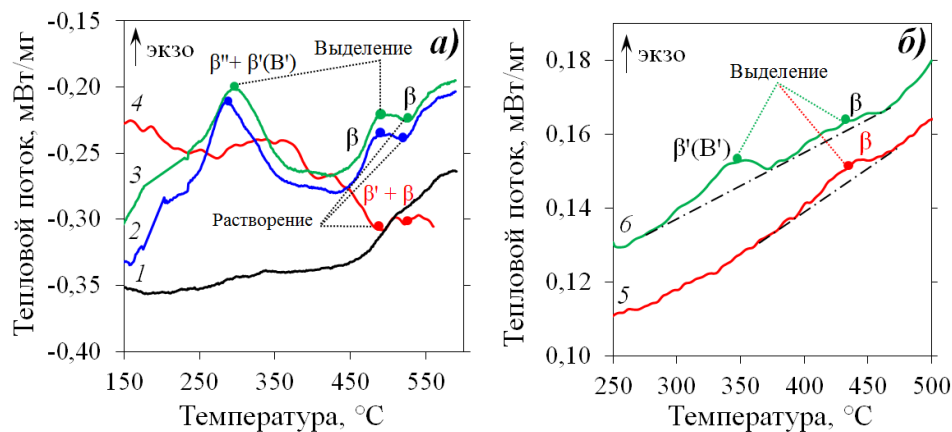


Рис. 6. Кривые ДСК листов из сплава В-1341 при нагреве (а) со скоростью 0,3 °С/с (1–4) и при охлаждении (б) со скоростью 0,1 °С/с (5) и 0,2 °С/с (6) от температуры 530 °С: 1 – исходное (полунагартованное) состояние Н2; 2,3,4 – состояние Т после закалочного охлаждения со скоростью 1900 (2), 10 (3) или 0,1 (4) °С/с

На кривой ДСК при охлаждении (кривая 6, $V_{\text{охл}} = 0,2$ °С/с, Рис. 6, б) зафиксированы два экзотермических пика, которые, по-видимому, соответствуют последовательному выделению фаз β -типа из твердого раствора. Высокотемпературный пик в температурном интервале от 450 до 375 °С проинтерпретирован как выделение равновесной β -фазы, а низкотемпературный пик в температурном интервале от 375 до 300 °С – как выделение метастабильной $\beta'(B')$ -фазы. При уменьшении скорости охлаждения (кривая 5, $V_{\text{охл}} = 0,1$ °С/с) доминирует выделение β -фазы, а при увеличении скорости охлаждения ($V_{\text{охл}} = 0,5$ °С/с) образование β -фазы подавляется и наблюдается преимущественное выделение $\beta'(B')$ -фазы.

По результатам исследования механических свойств при растяжении и микротвердости листов из сплава В-1341 в состоянии Т1 (Рис. 7, а) установлено, что критическая скорость закалки ($V_{\text{кр}}$) сплава по критерию $99,5 \% \cdot \sigma_{0,2}^{\text{max}}$ составляет 10 °С/с, что согласуется с вышеприведенными результатами ПЭМ и ДСК. Отмечено, что электропроводимость является более чувствительной характеристикой к изменению $V_{\text{охл}}$ по сравнению с прочностными свойствами.

Результаты коррозионных исследований (Рис. 7, б, Рис. 8) показали, что после закалки в холодной воде или водно-полимерной среде сплав В-1341 в состоянии Т1 имеет высокую стойкость к общей и местной коррозии, чувствительность к МКК практически отсутствует ($H < 60$ мкм). После закалки на спокойном воздухе ($V_{\text{охл}} = 7$ °С/с) сплав В-1341 сохраняет высокую коррозионную стойкость, при этом появляется чувствительность к МКК ($H < 85$ мкм). Закалка на спокойном воздухе с низкой скоростью охлаждения ($V_{\text{охл}} = 0,1$ °С/с) приводит к заметному снижению коррозионной стойкости сплава: 1) глубинный показатель общей коррозии увеличивается в 7 раз; 2) глубина и протяженность распространения местной коррозии повышаются в 2 раза; 3) появляется значительная чувствительность к МКК. Это объясняется растворением в коррозионной среде крупных закалочных выделений анодных фаз β -типа при образовании микрогальванических пар с включениями дисперсоидов катодной α -фазы или с границами зерен, а также с зонами, свободными от выделений.

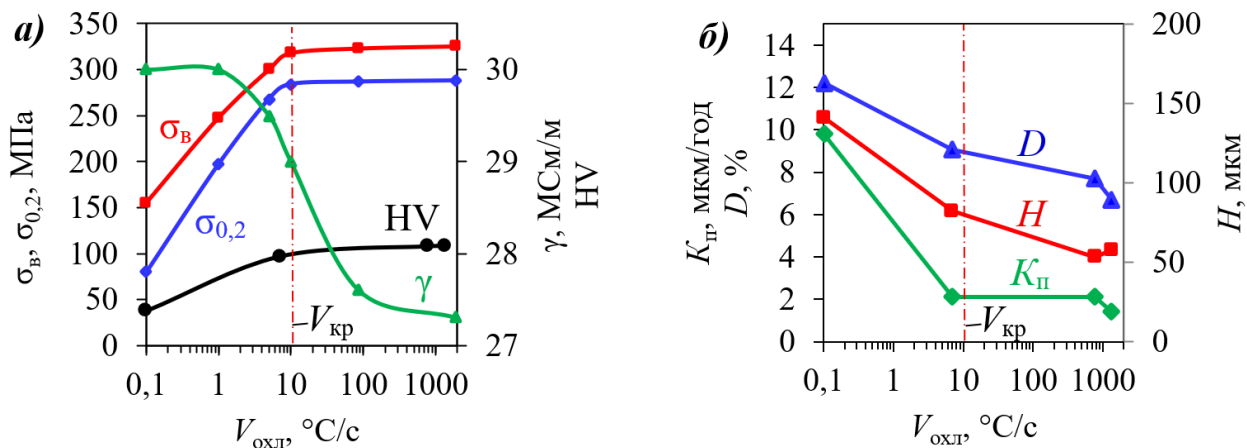


Рис. 7. Влияние скорости закалочного охлаждения на свойства листов из сплава В-1341Т1: а) временное сопротивление (σ_B), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), микротвердость (HV), электропроводность (γ); б) глубинный показатель коррозии ($K_{п}$), распространение местной коррозии (D) и её глубина (H)

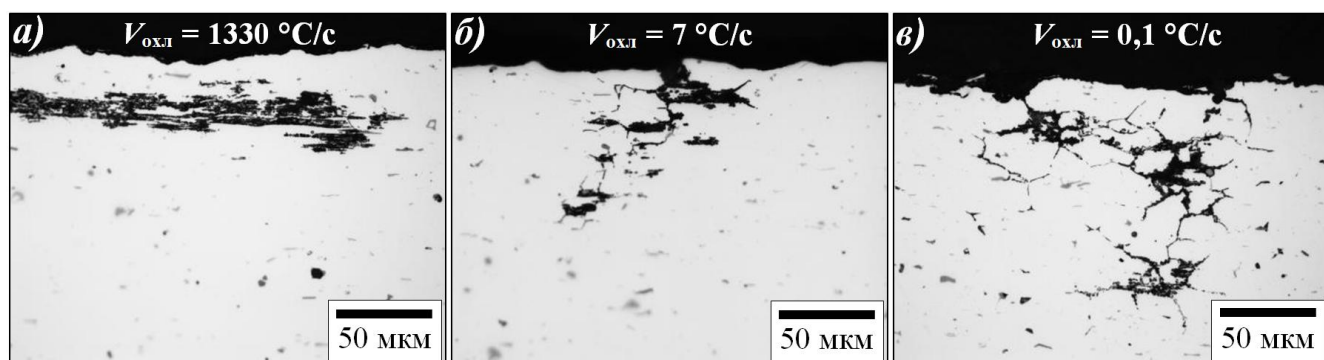


Рис. 8. Влияние скорости закалочного охлаждения на характер коррозионных поражений в поверхностной зоне листов из сплава В-1341Т1 после испытаний на стойкость к МКК

Глава 4 посвящена совершенствованию методики расчета кинетических параметров уравнения С-кривой изотермической ТВП-диаграммы для сплавов системы Al-Mg-Si с целью повышения точности расчета доли закалочных выделений и дисперсионного упрочнения при старении на основе математического моделирования.

Долю закалочных выделений f_q в процессе распада ПТР при изотермической выдержке можно описать с помощью классического уравнения Авраами–Колмогорова:

$$f_q(\tau) = 1 - \exp[-k\tau^n], \quad (1)$$

где k – температурно зависимая кинетическая константа, 1/с; τ – продолжительность изотермической выдержки, с; n – степенной показатель, зависящий от формы выделений.

Критическое время (инкубационный период) τ_c , по истечении которого образуется критическая доля закалочных выделений (f_c) в изотермических условиях, можно выразить из уравнения (1) следующим образом (уравнение С-кривой):

$$\tau_c(T) = -k_1 \cdot k_2 \cdot \exp\left(\frac{k_3 \cdot k_4^2}{R \cdot T(k_4 - T)^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{k_5}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

где k_1 – параметр, определяемый заданным значением f_c при изотермической выдержке; k_2 – параметр, обратно пропорциональный плотности потенциальных центров зародышеобразования и скорости роста зародышей, с; k_3 – параметр, пропорциональный энергии межфазной границы «матрица-зародыш» и энергии образования зародыша, Дж/моль; k_4 – параметр, соответствующий температуре сольвуса выделяющейся фазы, К; k_5 – параметр, соответствующий энергии активации диффузии наиболее медленно диффундирующего элемента, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, равная $8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Значения параметров k_2, k_3, k_4, k_5 принято определять методом градиентного спуска на основе экспериментально построенных С-кривых с использованием уравнения (2). Однако данный подход является относительно трудоемким и недостаточно надежным, поскольку наличие в уравнении одновременно четырех неизвестных приводит к множеству решений, среди которых затруднительно выделить единственное, физически обоснованное.

В настоящей работе предложена расчетно-экспериментальная методика определения неизвестных параметров k_2, k_3, k_4, k_5 уравнения (2) для сплавов системы Al-Mg-Si. Предлагаемая методика основывается на решении двух задач: 1) определение параметров k_4 и k_5 по экспериментальным данным или с помощью других моделей; 2) аналитический расчет параметров k_2 и k_3 путем математической обработки уравнения (2).

С использованием разработанной методики достоверно описаны экспериментально построенные С-кривые диаграммы «температура-время-условный предел текучести» для ряда промышленных сплавов серии 6XXX (6061, 6063, 6082, 6007, 6205), взятые из литературных источников (Рис. 9). Максимальное отклонение между рассчитанной и экспериментальной С-кривыми составило не более 8 %. Далее аналогичным образом были определены параметры уравнения С-кривой для исследуемого сплава В-1341.

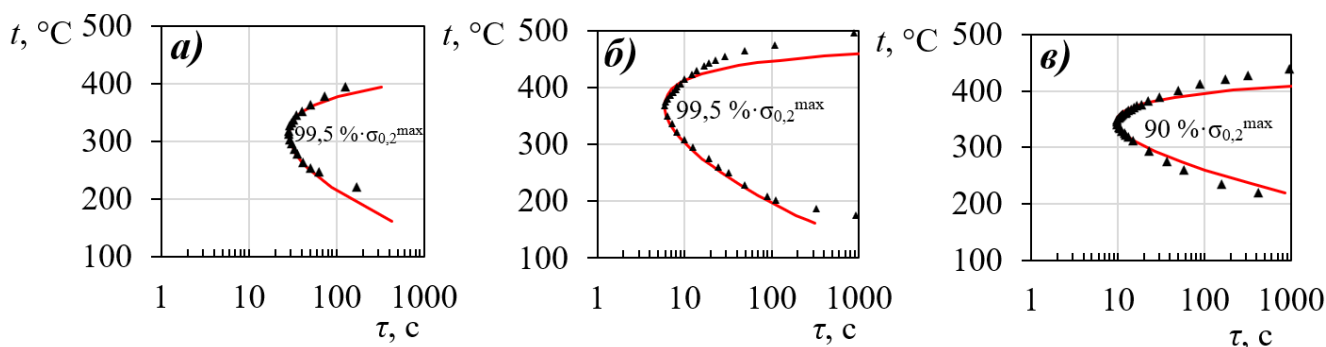


Рис. 9. Рассчитанные изотермические ТВП-диаграммы (сплошная линия) и экспериментально построенные изотермические диаграммы «температура-время-условный предел текучести» (точечная линия) для сплавов 6082 (а), 6061 (б) и 6007 (в)

Кривую непрерывного закалочного охлаждения можно разложить на i -е число изотермических выдержек («ступенек»), что позволяет применить аддитивный принцип для расчета суммарной доли закалочных выделений по уравнению (1). На основе такого подхода с использованием модели (1) для сплава В-1341 рассчитана доля выделений в широком диапазоне скоростей закалочного охлаждения. По полученным зависимостям построена термокинетическая ТВП-диаграмма при выделении $\beta'(B')$ -фазы (Рис. 10), описывающая кинетику высокотемпературного распада ПТР сплава В-1341 при замедленном закалочном охлаждении, что позволяет обоснованно выбирать режимы охлаждения при малодеформационной закалке.

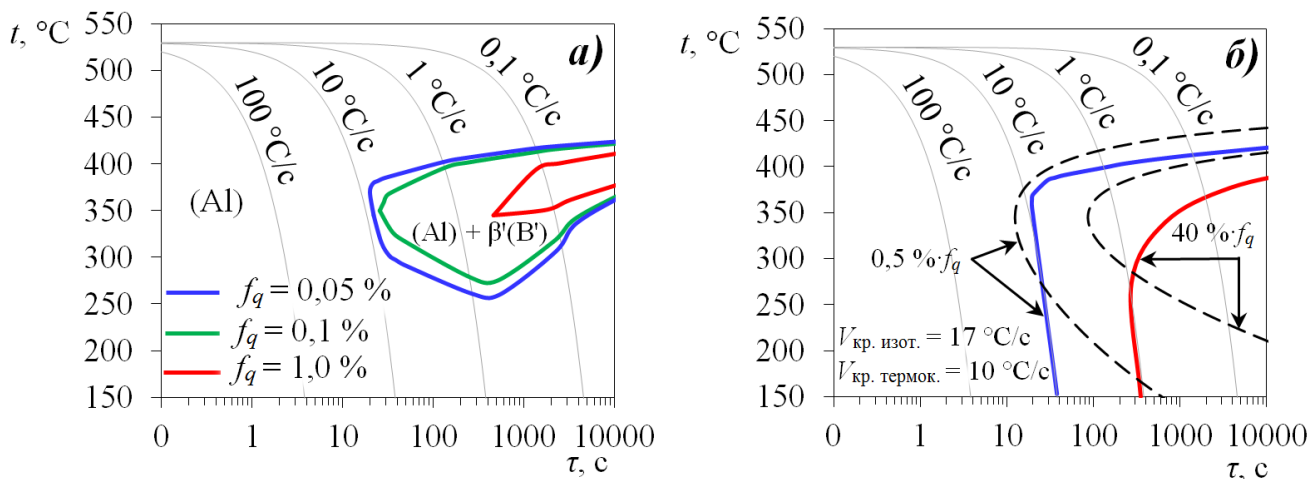


Рис. 10. Рассчитанные термокинетические ТВП-диаграммы при выделении $\beta'(B')$ -фазы для листов из сплава В-1341: а) диаграмма, построенная по критерию начала (верхняя линия) и конца превращения (нижняя линия); б) диаграмма, построенная по критерию образования 0,5 % и 40 % суммарной доли выделений (f_q) (для сравнения штриховыми линиями изображена рассчитанная изотермическая ТВП-диаграмма)

С целью валидации разработанной методики расчета параметров уравнения (2) проведено сравнение значений экспериментально определенного и рассчитанного условного предела текучести листов из сплава В-1341Т1. Расчет предела текучести осуществлялся по методике, основанной на анализе закалочного фактора, согласно которой модель дисперсионного упрочнения когерентными частицами, формирующимися при старении, имеет следующий вид:

$$\sigma_{0,2}(Q) = \sigma_{0,2}^{\min} + (\sigma_{0,2}^{\max} - \sigma_{0,2}^{\min}) \cdot (\exp[-k_1 Q]) \quad , \quad (3)$$

где $\sigma_{0,2}^{\min}$ – предел текучести сплава без дисперсионного упрочнения частицами, образованными при старении; $\sigma_{0,2}^{\max}$ – предел текучести сплава с максимальным дисперсионным упрочнением частицами, образованными при старении.

Закалочный фактор Q – относительное суммарное время пребывания сплава в критическом температурном интервале закалочного охлаждения. Величина Q определяется на основе данных, характеризующих режим закалочного охлаждения $V(T)$ и устойчивость ПТР, задаваемую функцией $\tau_c(T)$, по следующему выражению:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{V(T) \cdot \tau_c(T)} \quad , \quad (4)$$

где T_1 – температура закалочной среды; T_2 – температура обработки на твердый рас-твор.

Установлено, что учтенные в модели (4) значения параметров уравнения (2), рассчитанные по предложенной методике, позволяют достаточно точно прогнозировать предел текучести листов из сплава В-1341Т1: максимальная ошибка составила 1,8 %. При этом точность прогноза предела текучести повышена на 27 % по сравнению со значениями, полученными при использовании параметров, определенных стандартным методом градиентного спуска. Таким образом, это способствует обоснованному выбору режимов охлаждения при малодеформационной закалке для обеспечения заданного уровня прочностных свойств.

Глава 5 посвящена разработке практических рекомендаций по малодеформационной закалке различных тонкостенных изделий из сплава В-1341 с использованием полученных результатов исследований.

На основе компьютерного моделирования определено температурное поле листовых заготовок из сплава В-1341 толщиной от 0,1 до 4,0 мм при закалочном охлаждении в газовых средах, имеющих заданный постоянный коэффициент теплоотдачи от 30 до 100 Вт/(м²·К) в зависимости от выбранной среды. С помощью модели (3) рассчитан предел текучести материала в сердцевине листа, где наблюдалась наименьшая скорость закалочного охлаждения. По результатам расчетов установлено, что предельная толщина листов для полной закалки ($V_{\text{охл}} \geq V_{\text{кр}}$) в рассмотренных средах составляет 2,0 мм.

Для малодеформационной закалки изделий толщиной более 2,0 мм предложено использовать водно-полимерную среду на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида (ПЭО). Анализ охлаждающей способности сред при закалке листовых образцов толщиной 4 мм показал, что водно-полимерная среда на основе ПЭО обеспечивает более равномерное охлаждение, чем холодная и горячая вода. При этом для образцов достигается полная закалка, в том числе при повышенной концентрации полимера (0,2–0,3 % ПЭО). Выявлено также, что при закалке образцов в газовой среде (азот, воздух) повышение скорости циркуляции или давления среды позволяет увеличить $V_{\text{охл}}$ в 2–10 раз по сравнению с охлаждением на спокойном воздухе.

Экспериментальное исследование малодеформационной закалки листовых заготовок (пластин) толщиной 1,2 мм (Рис. 11) показало, что охлаждение в водно-полимерной среде с предложенной повышенной концентрацией полимера (0,2 % ПЭО) позволяет уменьшить величину коробления в 10–12 раз по сравнению с охлаждением в холодной воде, и в 5 раз по сравнению с охлаждением в водно-полимерной среде со стандартной концентрацией полимера (0,1 % ПЭО). При закалке на воздухе коробление практически не наблюдается. Установлено, что после закалки в указанных средах обеспечивается следующий уровень механических свойств материала в состоянии Т1: $\sigma_{\text{в}} = 311\text{--}336$ МПа; $\sigma_{0,2} = 269\text{--}288$ МПа; $\delta = 14,0\text{--}14,9$ %. При этом показано, что охлаждение на воздухе со скоростью потока 3 м/с позволило на 2–5 % повысить $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$ по сравнению с охлаждением на спокойном воздухе.



Рис. 11. Внешний вид листовых заготовок толщиной 1,2 мм из сплава В-1341 после закалки в разные среды (стрелками указаны участки с наибольшим короблением):

1 – холодная вода; 2 – водно-полимерная среда (0,1 % ПЭО); 3 – водно-полимерная среда (0,2 % ПЭО); 4 – воздух

На основе полученных результатов исследований разработаны практические рекомендации по малодеформационной закалке тонкостенных изделий из сплава В-1341. Во-первых, даны рекомендации по выбору охлаждающей среды для закалки тонкостенных изделий в зависимости от их толщины.

Во-вторых, отмечено, что для закалки с охлаждением в водно-полимерной среде на основе ПЭО целесообразно использовать концентрацию полимера 0,2–0,3 % ПЭО, которая превышает стандартную предельную концентрацию (0,15 %), принятую для традиционных сплавов типа В95 и Д16 вследствие их высокой закалочной чувствительности. Увеличение концентрации полимера позволит достичь большей эффективности в снижении коробления без ущерба для свойств сплава В-1341. В-третьих, для изделий толщиной менее 2,0 мм предложено использовать газовые охлаждающие среды (воздух, гелий, азот), что обеспечит существенное снижение степени коробления. При этом $V_{\text{охл}}$ в наиболее медленно охлаждающихся зонах изделия должна превышать $V_{\text{кр}}$ сплава. При упрочняющей термической обработке паяных конструкций возможно совмещение операции закалки с охлаждением от температуры пайки в газовой среде с целью сокращения длительности и трудоемкости технологического процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были решены поставленные задачи и сделаны следующие основные выводы:

1. Анализ современного состояния проблемы показал, что на сегодняшний день малодеформационная закалка хорошо освоена при использовании водно-полимерных сред на основе ПЭО или ПАГ для промышленных алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Mg и Al-Zn-Mg-Cu. Технологические основы применения такой закалки для сплавов системы Al-Mg-Si остаются недостаточно разработанными.

Литературный обзор также показал, что для закалки изделий из сплавов системы Al-Mg-Si вместо холодной воды могут применяться газовые охлаждающие среды, которые позволяют значительно снизить коробление при сохранении требуемых свойств. При совмещении операции закалки в данных средах с охлаждением от температуры горячей деформации или высокотемпературной пайки также повышается производительность технологического процесса.

Выявлено, что закалочная чувствительность термически упрочняемых сплавов системы Al-Mg-Si-(Cu) (серия 6XXX) в настоящее время является важным предметом исследований. При этом остаются недостаточно изученными кристаллическая структура, морфология и механизм образования закалочных выделений, особенно в сплавах с добавкой меди.

2. Экспериментальное исследование закалочной чувствительности листов из сплава В-1341 показало, что критическая скорость закалки ($V_{\text{кр}}$) материала по критерию $99,5 \% \cdot \sigma_{0,2}^{\text{max}}$ составляет 10 °C/с, что соответствует уровню отечественного сплава-аналога АВ и серийных среднелегированных сплавов серии 6XXX (6005, 6061).

Высокотемпературный распад пересыщенного твердого раствора при замедленном закалочном охлаждении (ниже критической скорости закалки) сопровождается образованием фаз β -типа преимущественно по гетерогенному механизму: равновесная β -фаза (Mg_2Si) формируется на границах зерен, а метастабильные $\beta'(\text{Mg}_9\text{Si}_5)$ - и $\beta'(\text{Al}_3\text{Mg}_9\text{Si}_7)$ -фазы – на дисперсоидах α -фазы ($\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$).

Образование закалочных выделений способствует уменьшению доли выделения упрочняющих частиц $\beta''(\text{Mg}_5\text{Si}_6)$ -фазы при старении. В результате значительно увеличивается электропроводимость и постепенно уменьшается дисперсионное упрочнение по мере снижения скорости охлаждения с 10,0 до 0,1 °C/с, а также повышается склонность сплава к общей, питтинговой и межкристаллитной коррозии.

3. Разработана и валидирована усовершенствованная методика расчета кинетических параметров уравнения С-кривой изотермической ТВП-диаграммы при выделении метастабильной $\beta'(V')$ -фазы для сплавов системы Al-Mg-Si:

– на основе уравнения С-кривой с помощью разработанной методики достоверно описаны экспериментально построенные диаграммы «температура-время-условный предел текучести» для ряда промышленных сплавов серии 6XXX (6082, 6061, 6007, 6205, 6063), взятые из литературных источников;

– с использованием математической модели, основанной на анализе закалочного фактора, и экспериментальных данных показано, что рассчитанные по предложенной методике значения параметров уравнения С-кривой позволяют с повышенной точностью (на 27 %) прогнозировать предел текучести листов из сплава В-1341Т1 в зависимости от скорости закалочного охлаждения.

На основе математического моделирования впервые для листов из сплава В-1341 построена термокинетическая ТВП-диаграмма при выделении метастабильной $\beta'(V')$ -фазы.

4. Результаты компьютерного моделирования показали, что предельная толщина для полной закалки листов из сплава В-1341 в газовых средах с коэффициентом теплоотдачи до 100 Вт/(м²·К) составляет 2,0 мм. Для малодеформационной закалки изделий толщиной более 2,0 мм предложено использовать водно-полимерную среду на основе ПЭО.

5. Анализ полученных данных об охлаждающей способности различных сред при закалке листовых образцов толщиной 4 мм позволил установить, что водно-полимерная среда на основе ПЭО обеспечивает более равномерное охлаждение по сравнению с холодной и горячей водой. При этом достигается полная закалка образцов, в том числе при повышенных концентрациях полимера (0,2–0,3 % ПЭО). При закалке образцов в газовой среде (азот, воздух) повышение скорости циркуляции или давления среды позволяет увеличить скорость закалочного охлаждения в 2–10 раз по сравнению с закалкой на спокойном воздухе.

6. Экспериментально подтверждена эффективность применения воздуха или водно-полимерной среды на основе ПЭО в качестве охлаждающих сред для снижения коробления при закалке листовых заготовок из сплава В-1341 толщиной 1,2 мм. При охлаждении в водно-полимерной среде с предложенной повышенной концентрацией полимера (0,2 % ПЭО) величина коробления уменьшена в 10–12 раз по сравнению с охлаждением в холодной воде и в 5 раз по сравнению с охлаждением в водно-полимерной среде со стандартной концентрацией полимера (0,1 % ПЭО). При охлаждении на воздухе коробление практически отсутствовало. Установлено, что после закалки в указанных средах обеспечивается следующий уровень механических свойств материала в состоянии Т1: $\sigma_b = 311–336$ МПа; $\sigma_{0,2} = 269–288$ МПа; $\delta = 14,0–14,9$ %.

7. На основе проведенных исследований разработаны практические рекомендации по малодеформационной закалке тонкостенных изделий из сплава В-1341, которые применены в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для разработки технологии малодеформационной закалки листовых деталей и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Закалочная чувствительность деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si (обзор)/ И. Бенариев, Ю.А. Пучков [и др.] // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 03. С. 25-46. (1,2 п.л./ 0,7 п.л.)

2. Особенности формирования закалочных выделений в листах из алюминиевого сплава В-1341 системы Al-Mg-Si/ *И. Бенариев* [и др.] // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 05. С. 53-66. (0,8 п.л./ 0,5 п.л.)
3. Малодеформационная закалка листов из алюминиевого сплава В95 в низкоконцентрированной водно-полимерной среде на основе отечественных компонентов/ А.Л. Иванов, Т.А. Шляпникова, А.В. Сомов, А.А. Селиванов, *И. Бенариев* и др. // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 3 (80). С. 47-62. (0,9 п.л./ 0,2 п.л.)
4. Puchkov Y.A., *Benarieb I.* Influence of cooling modes during quenching on structure and corrosion resistance of alloy V-1341T1 // Inorganic Materials: Applied Research. 2024. Vol. 15. № 1. P. 46-53. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.)
5. Study of solid solution decomposition during quenching of sheets from aluminum alloy of Al-Mg-Si system/ *I. Benarieb*, Y.A. Puchkov [et al.] // Physics of Metals and Metallography. 2023. Vol. 124. № 1. P. 65-73. (0,6 п.л./ 0,3 п.л.)
6. Quench factor analysis for predicting precipitation hardening of sheets from aluminum alloy V-1341 of the Al-Mg-Si system/ *I. Benarieb* [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. 2022. Vol. 63. P. 583-589. (0,6 п.л./ 0,4 п.л.)
7. Effect of cooling rate under quenching on the structure and properties of sheets made of high-tech alloy V-1341 of the Al-Mg-Si system/ *I. Benarieb* [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. № 1. P. 202-207. (0,5 п.л./ 0,3 п.л.)
8. Пучков Ю.А., *Бенариев И.* Влияние режимов термической обработки на структуру и стойкость к общей коррозии листов из алюминиевого сплава В-1341 системы Al-Mg-Si // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23. № 6. С. 268-276. (0,7 п.л./ 0,3 п.л.)
9. *Бенариев И.*, Пучков Ю.А., Шумейко Р.М. Влияние режимов термической обработки на структуру и стойкость к общей и местной коррозии листов из алюминиевого сплава В-1341 системы Al-Mg-Si // Технология легких сплавов. 2025. № 3. С. 18-32. (0,9 п.л./ 0,4 п.л.)
10. Особенности распада переохлажденного твердого раствора при закалке листов из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al-Mg-Si / Е.Н. Каблов, В.А. Дуюнова, *И. Бенариев* [и др.] // Технология легких сплавов. 2020. № 3. С. 20-33. (1,0 п.л./ 0,3 п.л.)
11. *Бенариев И.*, Пучков Ю.А. Разработка методики расчета параметров С-кривых диаграмм температура-время-свойство деформируемых сплавов системы Al-Mg-Si // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 2. С. 83-89. (0,6 п.л./ 0,4 п.л.)
12. Опыт применения дифференциальной сканирующей калориметрии в структурно-фазовом анализе металлических материалов/ С.Ю. Шорстов, М.Г. Размахов, С.И. Пахомкин, *И. Бенариев* // В сборнике: XV Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». 2023. С. 166-186. (0,8 п.л./ 0,2 п.л.)
13. Исследование распада переохлажденного твердого раствора деформируемого термически упрочняемого сплава В-1341 системы Al-Mg-Si / *И. Бенариев*, Ю.А. Пучков [и др.] // В сборнике: Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и антикоррозионной защиты легких сплавов. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 35-49. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)
14. Прогнозирование влияния режима закалки на механические свойства листов из термически упрочняемого алюминиевого сплава В-1341 / *И. Бенариев*, Ю.А. Пучков [и др.] // В сборнике: Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». Материалы IV Всероссийской конференции. 2018. С. 58-70. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)
15. *Бенариев И.*, Пучков Ю.А. Совершенствование технологии термической обработки изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si на основе математического моделирования // В сборнике: Современные достижения в области металловедения, технологий литья, деформации, термической обработки и антикоррозионной защиты легких сплавов. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 7-21. (0,4 п.л./ 0,3 п.л.)